



Interaction Site-Ville: Approches expérimentales et numériques

Philippe Gueguen, Jean François Semblat, Pierre Yves Bard, Jean Louis Chazelas

► To cite this version:

Philippe Gueguen, Jean François Semblat, Pierre Yves Bard, Jean Louis Chazelas. Interaction Site-Ville: Approches expérimentales et numériques. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2013, 279, pp 35-46. hal-00850957

HAL Id: hal-00850957

<https://hal.science/hal-00850957>

Submitted on 9 Aug 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Interaction Site-Ville : approches expérimentales et numériques

Philippe GUÉGUEN

IFSTTAR-Isterre, Université de Grenoble

Jean-François SEMBLAT

UPE-IFSTTAR, Paris

Pierre-Yves BARD

IFSTTAR-Isterre, Université de Grenoble

Jean-Louis CHAZELAS

UNALM-IFSTTAR, Nantes

■ Résumé

À l'échelle d'une ville, les structures de surface telles que les bâtiments peuvent modifier le mouvement sismique en « champ libre » et agir comme des sources sismiques secondaires. Des observations ont en particulier été réalisées sur des données réelles. Elles montrent que cet effet peut être significatif. La conséquence directe de cette « interaction site-ville » est la pollution du mouvement sismique en milieu urbain par un champ d'onde secondaire. Des modélisations en centrifugeuse et numériques tendent à confirmer que ce phénomène n'est pas anecdotique. En particulier, ces résultats montrent qu'entre deux bâtiments proches des interactions existent, modifiant le mouvement du sol mais aussi la réponse des structures impliquées. À l'échelle d'une ville, ce phénomène sera d'autant plus marqué lorsqu'un fort couplage existe entre la réponse du sol et la réponse du milieu urbain.

Site-city interaction: Experimental and numerical approaches

■ Abstract

At the scale of a city, surface structures such as buildings can modify the "free field" seismic motion and act like secondary seismic sources. A number of observations have been conducted on actual datasets; these have demonstrated that such an effect may indeed be significant. The direct consequence of this "site-city interaction" is the contamination of seismic motion in an urban setting by a secondary wave field. Both centrifugal and numerical modeling efforts tend to confirm that this phenomenon is not incidental. More specifically, results indicate that between two buildings located close to one another, interactions occur that modify not only the soil movement but also the response of structures subjected to the movement. At the scale of a city, this phenomenon will become even more pronounced whenever strong coupling exists between the soil response and the response of the urban environment.

INTRODUCTION

Les ingénieurs de structures et les géotechniciens savent depuis de nombreuses années que l'interaction sol-structure (ISS) peut modifier considérablement le comportement d'une structure quand celle-ci est fondée sur un sol mou. Les sismologues, eux, savent qu'il n'est pas judicieux d'installer des stations sismologiques près des arbres ou près d'immeubles imposants, car ils peuvent modifier le signal sismique. Pendant les dernières décennies, il est aussi apparu clairement que les hétérogénéités de surface pouvaient influencer considérablement le signal sismique. Ces effets, appelés effets de site (ES), sont en général les plus forts en présence de sols mous. Sur cette base, il est légitime de se demander comment un bâtiment fondé sur sol mou et soumis à une sollicitation sismique perturbe le mouvement du sol situé à proximité immédiate. En poursuivant ce raisonnement, on peut également se demander comment une zone urbaine constituée de plusieurs bâtiments va perturber le mouvement sismique urbain, justement par l'effet des vibrations des structures sur le sol.

Le but de cet article est de présenter une vue d'ensemble des résultats et des observations qui tendent à montrer l'existence de ce genre d'interaction globale entre tous les bâtiments d'une ville et son sous-sol (que nous appellerons ici « interaction site-ville », ISV). En dépit d'une littérature abondante sur l'interaction sol-structure et sur les effets de site, peu d'attention a été portée aux phénomènes d'interaction site-ville. Ceci pourrait signifier que cette interaction est négligeable. Pourtant, si les effets d'interaction site-ville s'avèrent significatifs, la construction ou la destruction d'un bâtiment, ou d'un groupe de bâtiments, pourrait modifier le risque sismique pour les constructions voisines. Ceci pourrait simultanément conduire à des changements conceptuels cruciaux, en particulier en termes d'études de microzonage et de politique d'aménagement urbain.

MISE EN ÉVIDENCE EXPÉRIMENTALE

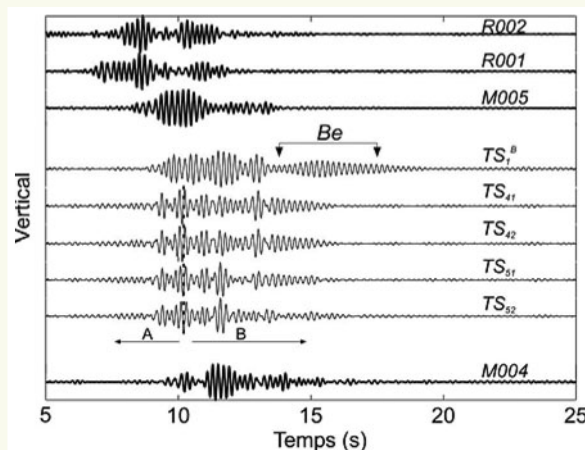
■ Observations in-situ

Au début des années 1970, en forçant le bâtiment de la Millikan Library (campus de Caltech) à vibrer, Jennings (1970) a montré que le mouvement de la structure pouvait être détecté par des stations sismologiques situées jusqu'à plusieurs kilomètres de distance. La même expérience a été répétée récemment par Favella (2004) et a confirmé l'émission d'ondes se propageant à l'extérieur de la base de bâtiment. Une deuxième observation est associée à l'entrée dans l'atmosphère de la navette spatiale Colombia lors de son trajet de retour vers la base aérienne d'Edwards en Californie (Kanamori et al., 1991). Deux stations sismologiques large-bandes situées à Pasadena et à l'Université de Californie du Sud (« USC », centre de Los Angeles) ont enregistré une impulsion de 2 ou 3 secondes de période, qui est arrivée à Pasadena 12 s avant l'onde de choc et à USC 3 s après l'onde de choc. Kanamori et al. (1991) ont clairement identifié cette impulsion comme étant provoquée par le mouvement des gratte-ciels du centre ville de Los Angeles, qui se sont mis à vibrer sous l'effet de l'onde de choc se propageant dans l'air. Les mêmes auteurs ajoutent que la proximité de la période propre des gratte-ciels avec celle de la fonction de transfert du bassin de Los-Angeles a permis d'exacerber le couplage entre immeubles et sol. Plus récemment, lors des attaques terroristes contre le World Trade Center de New-York, les impacts des deux avions ont été enregistrés par plusieurs stations sismologiques dans l'état de New-York, à des distances de plusieurs dizaines de kilomètres (Kim et al., 2001), montrant là encore que les vibrations des structures génèrent des champs d'ondes sismiques se propageant dans le sol. Enfin, une expérience sismologique temporaire réalisée à Grenoble (Cornou et al., 2004) a montré l'effet de la présence d'une cheminée sur le bruit de fond sismique enregistré sur le sol.

Cependant, dans ces quatre observations, l'excitation des bâtiments était artificielle. Elles ont toutes le mérite de prouver qu'il y a des cas où l'énergie du bâtiment vibrant peut être transmise de façon efficace (fort couplage) au sol. Le même genre de phénomènes peut se produire quand la vibration du bâtiment est provoquée par une excitation au niveau du sol. Dans ce cas, cependant, l'observation directe est beaucoup plus difficile car le mouvement au sol à proximité des bâtiments est une superposition du champ d'onde sismique direct et du champ diffracté par le bâtiment. Seuls des réseaux très denses de sismographes peuvent permettre la séparation des différentes contributions. Néanmoins, lors d'une expérience menée sur le site test de Volvi (Grèce), des capteurs sismologiques situés à proximité d'une structure en béton à échelle réduite ont montré des ondes particulières se propageant depuis la structure (Guéguen et Bard, 2005), celle-ci étant soumise à des tirs d'explosif réalisés à proximité. Ces ondes avaient une période identique à celle de la structure et leur amplitude s'atténuait avec la distance à la structure (**Figure 1**). Un autre ensemble intéressant d'observations vient du stade d'Ullevi à Göteborg (Suède), qui a subi des vibrations inattendues, rapportés par Erlingsson et Bodare (1996) et Erlingsson (1999). Pendant un concert de rock qui s'est tenu dans le stade, l'assistance située sur le terrain a commencé à sauter en rythme avec la musique (avec une fréquence autour 2 Hz). Les ondes émises dans le stade par le public ont été piégées dans la couche de sol et elles ont à leur tour excité la base des tribunes et ces dernières se sont mises à vibrer suffisamment pour que ces vibrations soient ressenties par le public ayant pris

figure 1

Enregistrements (composante verticale) filtrés autour de la fréquence de la structure du site test de Volvi (Grèce), collectés lors d'un tir d'explosif réalisé à proximité de la structure. Les stations TS sont à proximité immédiate de la structure. Le secteur A est le champ incident, le secteur B est contaminé par la vibration de la structure.



place dans les tribunes. Une étude numérique complète a prouvé que la grande amplitude de ces vibrations était due à la nature de la couche d'argile, à sa géométrie, avec des variations latérales d'épaisseur qui ont rendu le piégeage des ondes plus efficace, et enfin à la coïncidence entre la fréquence du battement et la fréquence du sol.

Enfin, l'analyse de bâtiments instrumentés montre un autre fait marquant : comme rapporté dans diverses publications scientifiques (Bard, 1988 ; Bard et al., 1992 ; Farsi, 1996 ; Paolucci, 1993 ; Meli et al., 1998 ; Cardenas et al., 1999), les bâtiments fondés sur sols mous sont très souvent animés d'un mouvement de basculement très fort, essentiellement dû à l'interaction sol-structure. Ceci a été observé même pour des structures fondées sur pieux. Par « mouvement fort », nous voulons dire que le mouvement basculant représente plus de 10 % du mouvement de flexion pure. Dans quelques cas particuliers, cette proportion atteint 100 %, comme le rapportent, par exemple, Bard et al. (1992). Ces auteurs ont observé des moments de basculement agissant au niveau du sol et générant des ondes sismiques assez énergétiques.

En résumé, bien qu'aucune observation claire n'ait été faite sur l'effet de la présence de structures sur le mouvement du sol en « champ libre » pendant des tremblements de terre, l'ensemble des observations démontre que les effets d'interaction sol-structure peuvent être considérables.

■ Observations en centrifugeuse

➤ Modélisation à échelle réduite en centrifugeuse

La modélisation à échelle réduite en centrifugeuse est un moyen expérimental puissant en dynamique des sols. Elle combine à la fois la réduction d'échelle et la représentativité à échelle réelle des phénomènes. Puisque les propriétés mécaniques des sols sont fortement liées à leur état de contrainte, travailler sur des modèles physiques à échelle réduite pose une difficulté majeure : les efforts induits sont très faibles et la réponse du sol diffère beaucoup de sa réponse dans un massif naturel. La pesanteur artificielle créée dans une centrifugeuse permet de surmonter ce problème : la densité du sol du modèle reste constante et, puisque le facteur d'échelle des dimensions est $1/N$, une augmentation de N de la pesanteur reconstituera le champ de contrainte réel. Comme la réduction des échelles rend les études paramétriques possibles, des modélisations spécifiques peuvent être conduites en centrifugeuse. Ainsi, depuis les années 1980, la modélisation en centrifugeuse a rencontré un grand succès dans le domaine de la sismologie de l'ingénieur. Ces expérimentations sont généralement décrites en détail dans les conférences spécifiques aux centrifugeuses (Corté, 1988 ; Ko et McLean, 1991 ; Leung et al., 1994 ; Kiimura et al., 1998 ; Phillips et al., 2002 ; Semblat et Luong, 1998). Cependant, il ne faut pas oublier qu'une attention particulière doit être prêtée aux effets de bords qui peuvent exister lors des essais, puisque le sol embarqué dans la nacelle de la centrifugeuse a un volume limité.

► Mise en évidence de l'interaction sol-structure sur des modèles centrifugés simples

Le premier objectif de ces travaux était de vérifier si le mouvement d'un bâtiment pouvait être affecté par la présence d'un autre bâtiment. Nous avons donc conçu une expérience avec un bâtiment « actif », c'est-à-dire sollicité par un choc, et un bâtiment identique passif situé à une certaine distance du bâtiment actif. Lors du choc, le mouvement a été enregistré au sommet de chaque bâtiment et nous avons analysé l'effet de la distance entre les deux bâtiments sur leur réponse. La conception des bâtiments modèles a été prévue pour reproduire un bâtiment de sept étages avec une base de 15m x 15m, similaire à une structure analysée par Guéguen (2000) et Guéguen et al. (2002) à Mexico. Le facteur de réduction choisi était de $1/N = 1/100$. Afin de simplifier l'analyse, la conception de chaque bâtiment (Figure 2a) a été prévue pour reproduire un système à un seul degré de liberté (1 SDOF) : il est composé de deux lames portant la masse de la superstructure et encastrées dans une base. Cette conception permet de limiter les vibrations à une seule direction. Le modèle de sol était constitué de sable fin sec (sable de Fontainebleau) ayant un poids volumique homogène de $16,3 \text{ kN/m}^3$. Les détails de l'expérimentation peuvent être trouvés dans la publication de Chazelas et al. (2003).

Dans un premier temps, le bâtiment « actif » B1 est enfoncé dans le sable (fondation enfouie), au centre du modèle de sol. Le bâtiment « passif » B2 est simplement posé sur le sable (fondation superficielle), successivement à différentes distances et à différentes positions le long des directions radiales et transversales du massif de sol. La figure 2b montre les mouvements enregistrés au sommet des bâtiments pour une configuration donnée. En l'absence d'interaction, la réponse du bâtiment actif devrait demeurer la même, alors que le bâtiment « passif » ne devrait pas montrer de mouvement. Ce n'est clairement pas le cas : le bâtiment passif se déplace et le bâtiment actif montre des battements, qui sont de plus en plus prononcés lorsque le bâtiment B2 est plus proche du bâtiment B1. Les deux bâtiments « parlent » entre eux par l'intermédiaire du sol et les battements sont caractéristiques d'un couplage des valeurs des fréquences de résonance, qui sont semblables. Ces observations sont conformes aux observations expérimentales à échelle réelle de Kitada et al. (1999), rapportant des variations de fréquence de résonance d'un bâtiment selon l'existence ou pas de bâtiments voisins.

Deux autres résultats significatifs ont été déduits de ces expériences simples en centrifugeuse :

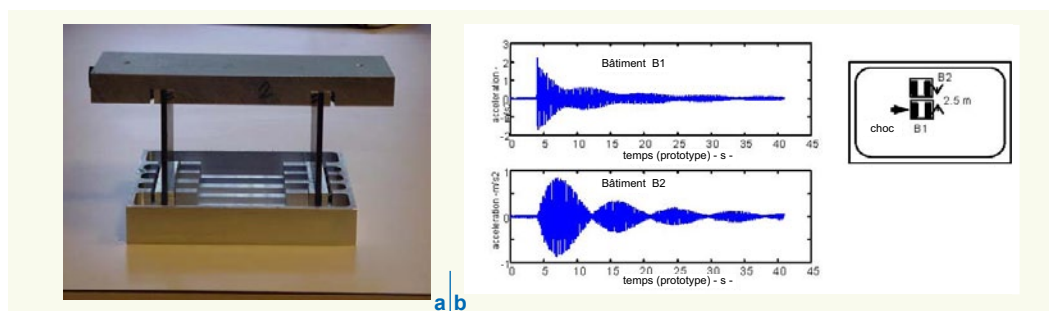
- l'interaction de structure à structure via le sol n'est significative que si les fréquences des structures sont assez proches. Comme les modèles de bâtiments utilisés sont faiblement amortis (1 % en raison de leur constitution mécanique), un décalage de 0,3Hz de leur fréquence de résonance (à échelle réelle) est suffisant pour annuler l'interaction. Des valeurs d'amortissement plus élevées, plus proches de la réalité (voir, par exemple, Farsi, 1996) permettent à l'interaction de se développer jusqu'à des décalages de fréquence plus élevés ;
- l'efficacité de ce phénomène est limitée. Dans les conditions expérimentales des essais (sable sec, valeurs des fréquences des structures), l'interaction est visible quand la distance entre les bâtiments B1 et B2 ne dépasse pas 25 à 30 m. Cette valeur doit cependant être considérée comme indicative : elle dépend fortement des propriétés d'atténuation du sol et des caractéristiques des structures.

Figure 2

Étude en centrifugeuse de l'interaction entre deux bâtiments (traduire la figure).

a : Modèle de bâtiment utilisé

b : Mouvement au sommet des bâtiments B1 et B2 en fonction du temps, lors d'un choc sur le bâtiment actif B1



MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE L'INTERACTION SITE-VILLE

Les observations faites sur des bâtiments instrumentés ont montré que la contamination du mouvement du sol par les bâtiments est possible, tout comme l'interaction entre les bâtiments. La modélisation de ces effets peut être abordée suivant deux approches, exactement de la même manière que les sismologues ont abordé la dispersion des ondes dans la croûte terrestre :

- l'interaction « simple » peut être modélisée en considérant chaque bâtiment comme isolé et en sommant les contributions de chacun ;
- l'interaction « multiple » inclut des effets de rétro-diffusion, c'est-à-dire le dialogue entre les bâtiments par l'intermédiaire du sol.

La première approche est valide seulement s'il y a une interaction faible, tandis que la seconde doit être considérée en cas d'interaction forte.

■ Interaction simple

➤ Modèle et calibrage : l'expérience de Volvi

La modélisation de l'interaction simple consiste à calculer le champ d'onde émis par un bâtiment vibrant. Ce calcul peut être séparé en deux étapes principales :

- estimer les forces générées par l'interaction sol-structure au niveau de la fondation ;
- calculer les ondes rayonnées dans le sol en utilisant un schéma numérique qui résout l'équation de l'élastodynamique.

La première étape peut être résolue par l'utilisation des fonctions d'impédance que l'on trouve dans la littérature (Guéguen et al., 2000, 2002) tandis que la deuxième peut s'appuyer sur la méthode du nombre d'onde discret (Bouchon, 1981), dans la version modifiée proposée par Hisada (1994, 1995)

Cette approche a été validée par une étude expérimentale réalisée sur le site test de Volvi (Grèce), comme discuté dans Guéguen et al. (2000). Dédié aux effets de site, ce site accueille également une structure en béton armé (poteau-poutre) de 5 étages construite à échelle réduite (1/3) (Manos et al., 1995). En relâchant brusquement la tension appliquée au sommet de la structure par l'intermédiaire d'un câble, il est possible de forcer la structure en vibration (oscillations libres). Le mouvement au sol résultant a été enregistré par une série de capteurs à différentes distances de la structure. Ces enregistrements ont ensuite été comparés aux calculs dérivés du modèle en deux étapes utilisé et décrit par Guéguen et al. (2000, 2002). Les principaux résultats de cette comparaison sont récapitulés sur la **figure 3**, qui montre clairement sur le sol un signal monochromatique semblable à la

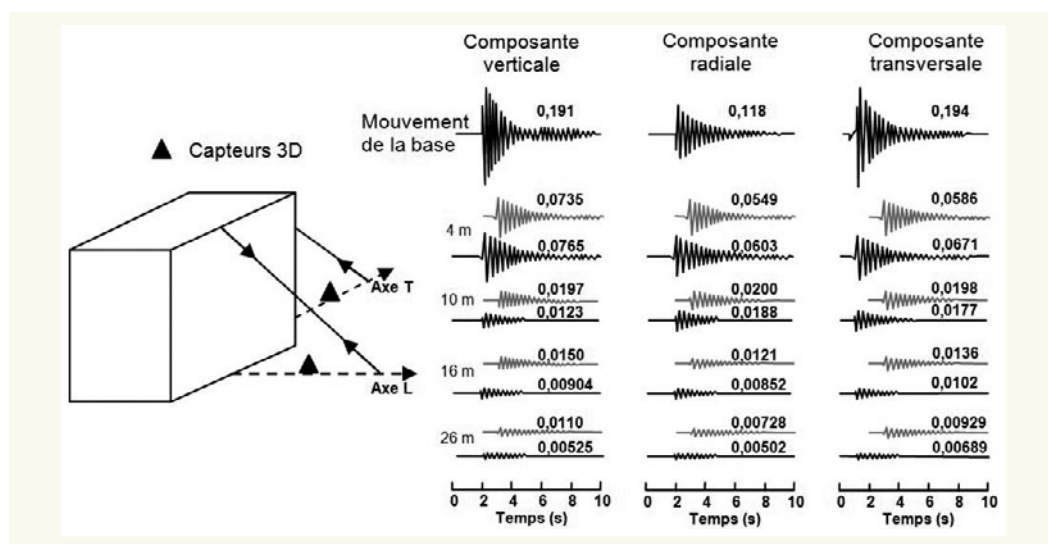


figure 3

Mouvement du sol observé (gras) et calculé (fin) dans les directions verticale et radiale, et transversale, respectivement dans le cas d'une excitation de la structure dans les directions longitudinale L et transversale T. (remonter aux figures originales)

réponse libre d'un oscillateur amorti. La fréquence et l'amortissement des signaux sont directement liés aux caractéristiques de vibration du bâtiment (4,761Hz dans la direction radiale T et 4,944Hz dans la direction longitudinale L). Comme prévu, l'amplitude décroît quand on s'éloigne de la structure, en conservant néanmoins des valeurs non négligeables, jusqu'à une distance cinq fois plus grande que la dimension de la fonction (environ 5 % du mouvement à la base). La ressemblance assez bonne entre les calculs et les observations fournit une validation du modèle simple.

➤ Application à Mexico

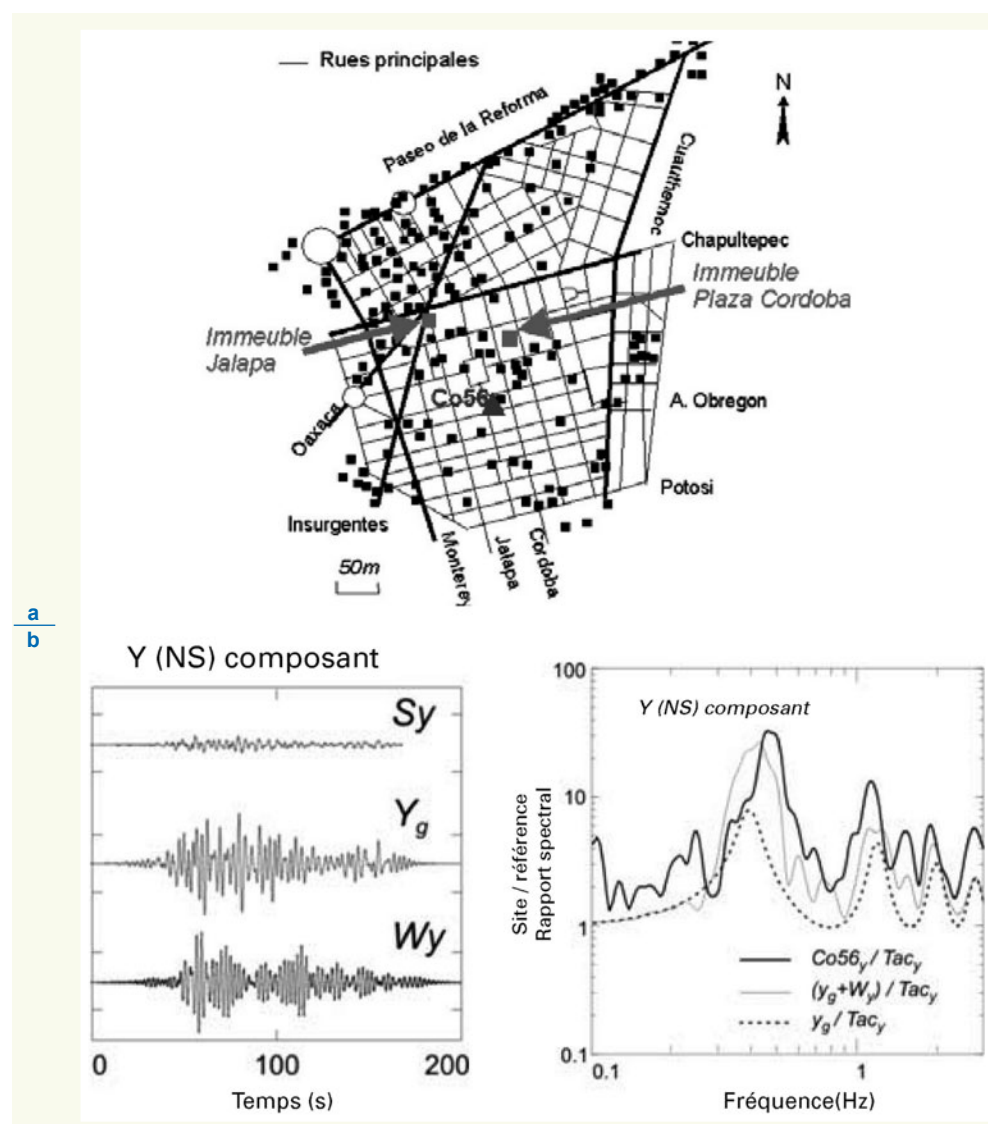
Ce modèle simple a été appliqué à Mexico, Grenoble et Nice pour évaluer les effets de l'interaction site-ville sur le mouvement en champ libre du sol d'une ville, composée de beaucoup de bâtiments. Dans cette approche simplifiée, le champ d'onde total rayonné par les bâtiments est simplement considéré comme la superposition des effets individuels de chaque bâtiment : ils sont supposés ne pas interagir les uns avec les autres. À cause de la constitution du bassin de Mexico (couche d'argile très molle de quelques dizaines de mètres d'épaisseur), nous discuterons uniquement les résultats obtenus pour la région de « Colonia Roma » à Mexico. Des détails additionnels peuvent être trouvés dans Guéguen (2000), Guéguen et al. (2002) et Bonnefoy-Claudet (2001) pour les villes de Nice et Grenoble.

Dans le secteur modélisé, dont la taille est environ 500x500 m², seuls les 180 bâtiments de 7 étages et plus ont été considérés (Figure 4). Le calcul en un point central du quartier de la contribution des immeubles subissant un séisme montre clairement que le mouvement du sol induit par la présence

figure 4
Modélisation de l'interaction site-ville du quartier Roma de la ville de Mexico.

a : Modèle de ville considéré pour le quartier Roma de Mexico (les carrés représentent la position des bâtiments ; Co56 la position où l'effet de l'interaction site-ville est calculé)

b : Mouvement du sol calculé à Co56 (S_y est le signal au rocher, Y_g le signal en champ libre et W_y le signal incluant le champ libre et les bâtiments) et estimation de la réponse du site en tenant compte (trait fin) ou pas (trait pointillé) des bâtiments comparée à la réponse expérimentale utilisant des séismes (trait gras).



des bâtiments est comparable au mouvement en champ libre en termes d'amplitude et de durée, alors que son contenu en fréquence montre une amplification autour de la fréquence fondamentale du site (0,5 hertz). En fréquence, cette modélisation prouve que les effets d'interaction sol-ville combleraient la différence de fréquence qui existe entre la fonction de transfert unidimensionnelle théorique du site et les amplifications réelles observées. Par ailleurs, une étude paramétrique conservant le même modèle de ville mais changeant les caractéristiques des bâtiments (Guéguen, 2000 ; Guéguen et al., 2002) prouve très clairement que les effets maximaux se produisent quand les fréquences des bâtiments coïncident avec la fréquence de sol. Cette étude montre également que l'énergie du champ d'onde rayonné peut atteindre vingt fois l'énergie du champ libre

■ Interaction multiple

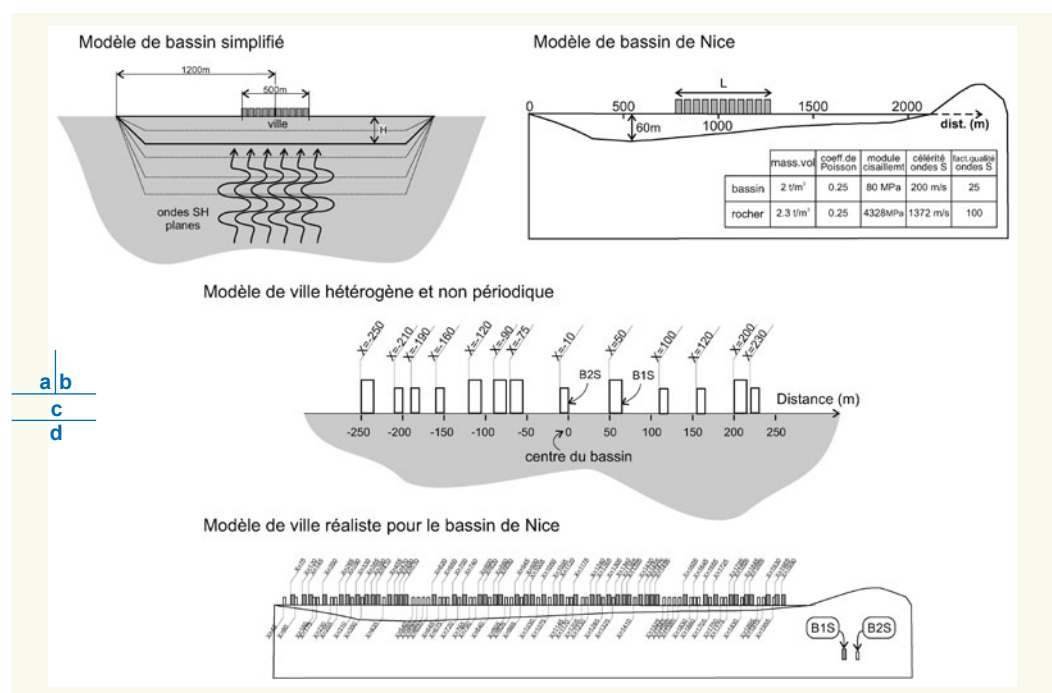
La prise en compte de l'interaction multiple nécessite des modèles numériques plus sophistiqués, tels que les éléments finis ou les méthodes d'éléments frontières et des moyens informatiques plus importants, en particulier lorsque l'on souhaite considérer des modèles de villes tridimensionnelles. Les premiers résultats sont donc plus récents, que ce soit pour les modèles bidimensionnels (Wirgin et Bard, 1996 ; Kham et al., 2003, 2006 ; Tsogka and Wirgin, 2003 ; Kham, 2004 ; Semblat et al., 2008) ou tridimensionnels (Clouteau and Aubry, 2001 ; Mezher, 2004). Nous nous limiterons dans cette section à la présentation de quelques résultats typiques dans le cas bidimensionnel.

➤ Le modèle canonique bidimensionnel

Plusieurs modèles de ville sont considérés, tous composés d'un grand nombre de bâtiments distribués sur une vallée bidimensionnelle. Dans tous les cas, la réponse des modèles est calculée par la méthode des éléments frontières pour une onde SH à incidence verticale (Bonnet, 1999). Dans un premier temps, nous nous concentrons sur le modèle « canonique » simple proposé dans Kham et al (2006) et composé d'une structure géologique très simple. Nous étudions la sensibilité de la réponse à quelques paramètres (rapport des fréquences sol/bâtiments, densité du bâti...).

La structure géologique (**figure 5a**) est une vallée alluviale trapézoïdale, large de 2,4 kilomètres, surmontant un demi-espace élastique infini. Les propriétés mécaniques des sédiments et du substratum correspondent à un cas de fort contraste d'impédance (8,6) et à un amortissement standard (2 % dans les sédiments et 0,5 % dans le substratum). Puisque l'épaisseur des sédiments est petite comparée à la largeur du bassin (rapport inférieur à 0,04), la réponse de la vallée en champ libre est

figure 5
Modèles de ville et de bassin pour l'analyse bidimensionnelle de l'interaction site-ville par la méthode des éléments de frontière (Kham et al, 2006 ; Semblat et al, 2008) :
a : en haut à gauche : modèle canonique de bassin ;
b : en haut à droite : modèle du bassin de Nice ;
c : milieu : ville non périodique pour le modèle canonique ;
d : en bas : modèle de ville pour Nice.
(il faut refaire la figure et la découper pour la numérotter)



essentiellement unidimensionnelle, avec cependant quelques perturbations bidimensionnelles dues aux arrivées tardives des ondes réfléchies sur les bords du bassin.

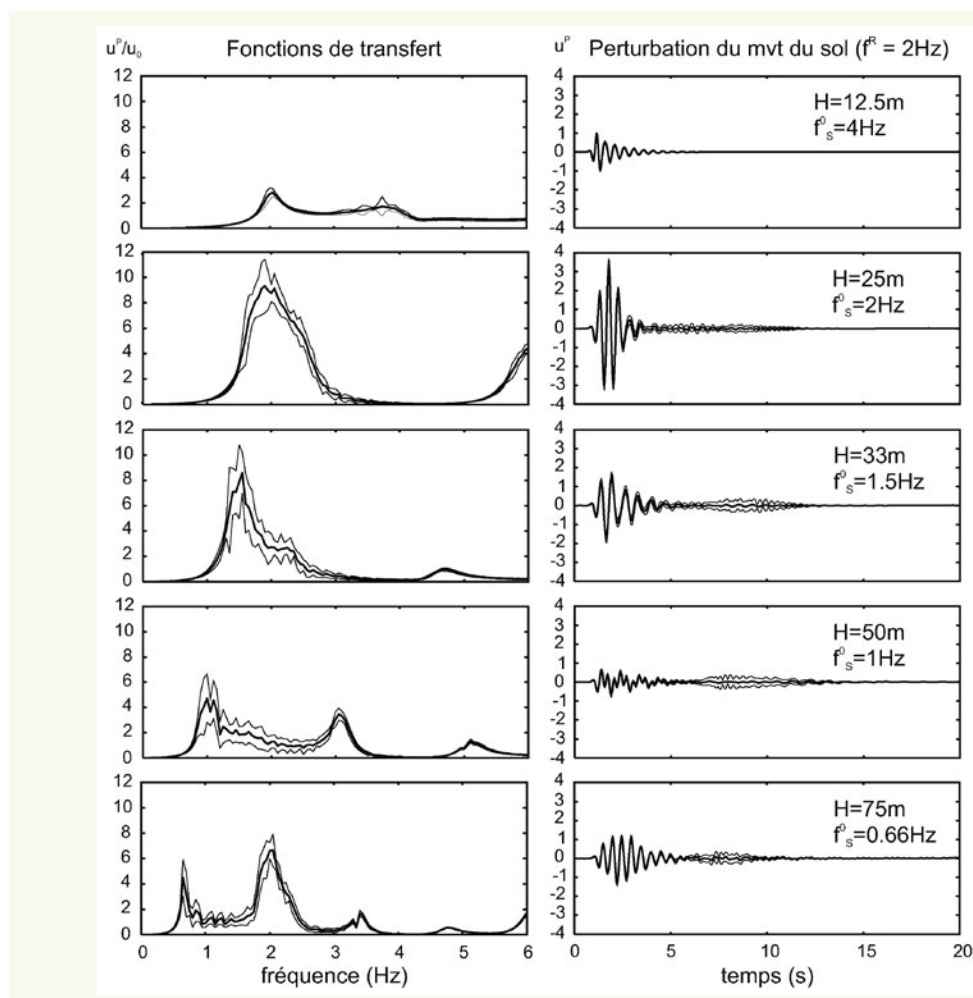
Deux configurations de ville sont ensuite considérées. La première (**figure 5a**) est une ville périodique constituée de N bâtiments identiques régulièrement distribués sur les 500 m de la partie centrale de la vallée. Le second modèle (**figure 5c**), moins régulier, est composé de bâtiments irrégulièrement espacés et différents les uns des autres. La configuration géométrique exacte de cette ville non-périodique est montrée sur la **figure 5c**. Par souci de simplicité, seuls deux types de bâtiments sont considérés (B1S et B2S), caractérisés par leur fréquence fondamentale respective (1 et 2 Hz) et leur dimension. Les bâtiments sont simplifiés par des éléments élastiques homogènes et continus, caractérisés par des propriétés mécaniques homogènes équivalentes. Les calculs ont été exécutés pour différentes configurations, afin d'estimer la sensibilité des phénomènes d'interaction site-ville à plusieurs paramètres importants :

- la densité urbaine $\theta = NB/L$, où N est le nombre de bâtiments, L la largeur du secteur urbanisé et B la largeur des bâtiments. Pour le cas d'une ville périodique, nous avons considéré quatre valeurs différentes de N (10, 16, 25, 33), correspondant respectivement à des valeurs de densité urbaine de 0,2 ; 0,32 ; 0,5 et 0,66. Pour la ville « non-périodique » constituée des bâtiments B1S et B2S, $\theta = 0,32$;
- l'épaisseur H des sédiments, qui contrôle la fréquence de résonance unidimensionnelle de la vallée pour une vitesse d'onde S constante. Nous avons considéré cinq épaisseurs ($H = 12,5$; 25 ; 33 ; 50 et 75 m), correspondant respectivement aux fréquences fondamentales de 4 ; 2 ; 1,5 ; 1,0 et 0,67 Hz. Par conséquent, pour le cas de la ville périodique impliquant uniquement des bâtiments B2S, le rapport des fréquences entre le site et les structures est égal à 2 ; 1 ; 0,67 ; 0,5 et 0,33.

Les résultats (**Figure 6a**) montrent des perturbations du mouvement du sol pour le cas de la ville périodique de densité urbaine maximale (33 bâtiments). La comparaison avec le cas sans bâtiments (champ libre) prouve clairement que les plus fortes perturbations se produisent pour $H = 25$ m, c'est-à-dire quand la fréquence de la vallée coïncide avec la fréquence des bâtiments (2 Hz). On peut également noter que, quelle que soit l'épaisseur de la vallée, les plus fortes perturbations apparaissent systématiquement autour de cette fréquence, en particulier pour $H = 75$ m, où la fréquence du bassin correspond au mode supérieur de vibration des structures. Les mêmes observations peuvent être faites dans le domaine temporel (**Figure 6b**) où le modèle est soumis à un signal de Ricker (Semblat et Pecker, 2009) d'incidence verticale et de fréquence centrale 2 Hz. De nouveau, les effets maximaux apparaissent clairement pour $H = 25$, 33 et 75 m, c'est-à-dire lorsque la réponse en champ libre montre une résonance (fondamentale ou harmonique) autour de 2 Hz. Un fait intéressant est l'effet global des bâtiments, qui réduit légèrement le niveau d'amplification à cette fréquence. De plus, la variation des résultats est faible quelle que soit la position dans la ville, ce qui semble montrer un effet de groupe des bâtiments. Ces résultats, montrés seulement pour un type d'onde incidente, ont été généralisés par Kham (2004). D'autre part, Kham et al (2006) ont constaté une perturbation à l'extérieur de la ville, exacerbée lorsque la densité urbaine est forte et lorsqu'il y a une résonance entre la ville et le bassin. Il a également montré que :

- dans une ville périodique, les effets d'interaction site-ville sont salutaires : le mouvement du sol est réduit ;
- cette réduction augmente avec la densité urbaine et elle est maximale quand les fréquences des constructions et du sol coïncident. En conditions optimales (la plus grande densité et résonance parfaite), la réduction atteint 50 % ;
- l'effet de la densité peut être significatif, même lorsque les fréquences ne coïncident pas. Par exemple, l'énergie du champ rayonné par rapport au champ incident est du même ordre (67 %) dans les cas « densité faible – résonance » et « densité forte – pas de résonance » ;
- ces effets de réduction diminuent de manière significative quand la régularité du bâti est cassée : la réduction pour les villes non-périodiques n'excède pas 15 %, ce qui peut s'expliquer par le faible nombre de bâtiments à 2 Hz et/ou le faible effet de groupe dû à la disposition irrégulière.

figure 6
Résultats des calculs pour le modèle canonique de ville périodique
a : Gauche : fonctions de transfert (moyenne +/- un écart type) pour le modèle canonique de ville périodique (bâtiment B2S) avec $N = 33$ et différentes valeurs de H (les solutions sont comparées au modèle sans bâtiments en pointillé).
b : Droite : perturbation du mouvement du sol dans le cas d'un signal de Ricker de fréquence centrale 2Hz.



► Le cas de la ville de Nice

Nous considérons maintenant une structure géologique plus réaliste correspondant à une section est-ouest du bassin de Nice (**figure 6b**). La réponse en champ libre (c'est-à-dire sans bâtiments) montre une résonance fondamentale autour de 1 Hz dans la partie la plus profonde du bassin ($H = 60\text{m}$), avec de fortes amplifications dues en partie aux effets bidimensionnels (Semblat et al., 2000 ; Kham, 2004). Les résultats principaux montrent que :

- presque tous les cas provoquent une réduction d'énergie du mouvement du sol à l'intérieur de la ville, dû à l'effet de groupe (coïncidence de fréquence) ou à l'effet d'inertie (densité urbaine) ;
- les seules exceptions correspondent à la ville périodique de B2S et à la partie la plus à l'est de la ville « réaliste », toutes les deux soumises à un signal de Ricker de fréquence 1 Hz. Ceci peut être interprété en raison du décalage vers les plus basses fréquences de la réponse du modèle site-ville provoqué par la présence des bâtiments, là où l'énergie de l'onde incidente est plus forte ;
- une certaine augmentation d'énergie apparaît souvent aux frontières des villes (effet de bord de la ville). Ces augmentations peuvent atteindre 50 % : ainsi, les plus petites structures établies sur les périphéries immédiates des centres-villes denses peuvent être exposées à un mouvement du sol plus important.

D'autres calculs ont également montré que des endroits de la ville peuvent présenter des augmentations locales du mouvement du sol, essentiellement dues à la configuration de la ville, aux propriétés dynamiques des bâtiments et du site et à la fréquence du signal d'entrée (Semblat et al, 2008). Cela confirme l'approche analytique simple présentée par Guéguen (2000) et Guéguen et al. (2002), qui montrent que l'effet site-ville dépend de la densité urbaine, de la résonance entre le bâti et le sol, du contraste d'impédance entre les sédiments et le substratum (pour favoriser le piégeage des ondes) et du rapport entre la hauteur moyenne du bâti et l'épaisseur des sédiments.

CONCLUSIONS

De cette compilation d'observations, d'expériences spécifiques et de calculs numériques, nous pouvons tirer quelques conclusions sur les effets du bâti sur le mouvement sismique en milieu urbain (Bard et al, 2005). Ces résultats indiquent tout d'abord que l'effet existe : l'expérience de Volvi a prouvé que le mouvement du sol est sensiblement perturbé à proximité immédiate d'un bâtiment et les essais en centrifugeuse indiquent que les bâtiments « communiquent » entre eux via le sol. Les simulations numériques soutiennent l'existence de l'interaction forte en cas de conditions favorables (présence de résonance entre le sol et le bâti et densité urbaine importante). L'origine physique est multiple : les ondes sont générées dans le sol à la base des bâtiments vibrants et sont piégées dans les couches superficielles lorsque le contraste est suffisant. Des effets de groupes apparaissent également lorsque les bâtiments sont proches. Dans le cas de fortes densités urbaines et/ou de bâtiments de grande taille, l'effet d'inertie produit quelques (légers) décalages de fréquence. Le phénomène est particulièrement exacerbé lorsqu'il y a coïncidence entre les fréquences du sol et du bâti : les conditions optimales pour une interaction site-ville significative sont donc la présence simultanée d'une couche mince de sédiments mous et d'une urbanisation dense avec des bâtiments homogènes ayant des fréquences similaires.

Bien qu'il y ait toujours un besoin de calculs tridimensionnels complémentaires, quelques résultats généraux semblent émerger du phénomène d'interaction site-ville. Dans le cas de l'interaction multiple forte, les effets semblent globalement salutaires : le mouvement du sol en milieu urbain est diminué, particulièrement pour des ensembles homogènes de bâtiments. Des amplifications locales ne peuvent cependant pas être complètement éliminées. L'effet globalement bénéfique devrait néanmoins être équilibré par le fait que l'interaction site-ville augmente de manière significative la variabilité du mouvement sismique en milieu urbain. Quelques amplifications significatives peuvent se produire localement, imprévisibles actuellement car fortement dépendantes du champ d'onde incident (fréquence et phase). En revanche, les secteurs situés aux bords des centres urbains denses et homogènes sont exposés à un mouvement du sol accru conséquence des effets de l'interaction site-ville à l'extérieur de la zone urbanisée. Ce phénomène est très semblable aux effets de bord de bassin observés par exemple dans Kobe.

Du point de vue sismologique, il semble important d'analyser les enregistrements sismiques en tenant compte de l'environnement urbain, en plus des effets de sources, de propagation et d'effets de site. Cette question est particulièrement importante quand des réseaux denses sont déployés dans des villes pour l'analyse du champ d'onde sismique. L'observation et l'analyse de la distribution des dommages devraient également tenir compte de l'interaction site-ville, car ils peuvent ne pas être uniquement dus à la variabilité de la vulnérabilité ou aux effets de site. Du point de vue du risque sismique, la leçon principale est que les secteurs urbains peuvent subir des modifications anthropiques. Ceci pourrait conduire à beaucoup de développements imprévisibles, par exemple dans l'aménagement urbain (en essayant de concevoir « une utilisation du territoire optimale » pour réduire le mouvement du sol) et dans l'évolution temporelle du risque (le risque peut changer au gré des constructions et des démolitions).

Cependant, avant de confirmer ces conséquences, la prochaine étape nécessaire est d'obtenir la preuve expérimentale incontestable de l'occurrence de ces effets dans des villes réelles soumises à des tremblements de terre. Il faudra donc instrumenter de façon spécifique des villes suivant des schémas instrumentaux particuliers et employer de nouvelles techniques sophistiquées de traitement du signal pour séparer les ondes incidentes des ondes induites par les structures.

REMERCIEMENTS

Une partie de ce travail a été réalisée avec le soutien du ministère français de l'éducation (projet « risque sismique urbain et interaction site-ville », programme ACI-CATNAT).

RÉFÉRENCES

- BARD P.-Y.** (1988). The importance of rocking in building motion : an experimental evidence. *Proceedings, Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, VIII, Tokyo-Kyoto, Japan, pp. 333–338.
- BARD P.-Y., AFRA H., ARGOUL P.** (1992). Dynamic behaviour of buildings : experimental results from strong motion data. *Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, ed. V. Davidovici (Ouest Editions – Presses Académiques, Nantes, France), pp. 441–478.
- BARD P.-Y., CHAZELAS J.L., GUÉGUEN P., KHAM M., SEMBLAT J.F.** (2005). *Assessing and managing earthquake risk - Chap. 5 : Site-city interaction*. Editeurs : C.S. Oliveira, A. Roca and X. Goula, Springer, 375 pages.
- BONNEFOY-CLAUDET S.** (2001). Interaction site-ville : application à Mexico et à Nice, *Mémoire de DEA MMGE*, Université Joseph Fourier-Grenoble I, juin 2001.
- BONNET M.** (1999). *Boundary integral equation methods for solids and fluids*, Wiley, Chichester, UK.
- BOUCHON M.** (1981). A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71, pp. 959–971.
- CARDENAS M., BARD P.-Y., CHAVÈZ-GARCIA F.J.** (1999). Comportement dynamique des bâtiments sous fortes sollicitations : le cas de Mexico. *Actes, 5^e colloque national de l'AFPS*, Cachan (France), I, pp. 181–188.
- CHAZELAS, J.L., GUÉGUEN P., BARD P.-Y., SEMBLAT J.-F.** (2003). Modélisation de l'effet site-ville en modèles réduits centrifugés. *Actes du 6^e colloque National AFPS*, Palaiseau, I, pp. 245–252.
- CLOUTEAU D., AUBRY D.** (2001). Modifications of the ground motion in dense urban areas, *Journal of Computational Acoustics*, 9, pp. 1659–1675.
- CORNOU C., GUÉGUEN P., BARD P.-Y., HAGHSHEENAS E.** (2004). Ambient noise energy bursts observation and modeling : Trapping of harmonic structure-soil induced-waves in a topmost sedimentary layer. *Journal of Seismology*, 8, pp. 507–524.
- CORTÉ J.F.** (Editor) (1988). Centrifuge 88. *Proceedings, International Conference on geotechnical centrifuge model*, Paris, 610 pages.
- ERLINGSSON S., BODARE A.** (1996). Live load induced vibrations in Ullevi stadium-Dynamic soil analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15, pp. 171–188.
- ERLINGSSON S.** (1999). Three-dimensional dynamic soil analysis of a live load in Ullevi stadium. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18, pp. 373–386.
- FARSI M.N.** (1996). Identification des structures de génie civil à partir de leurs réponses vibratoires. Vulnérabilité du bâti existant, *Thèse de doctorat*, Université de Grenoble (France), 194 pages.
- FAVELLA J.** (2004). *Energy radiation from a multi-story building*. Ph.D. thesis California Institute of Technology, Pasadena, California, 314 pages.
- GUÉGUEN P., BARD P.-Y., OLIVEIRA C.S.** (2000). Experimental and numerical analysis of soil motions caused by free vibrations of a building model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6), pp. 1464–1479.
- GUÉGUEN P., BARD P.-Y., CHAVEZ-GARCIA F.J.** (2002). Site-city seismic interaction in Mexico City like environments : an analytical study. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(2), pp. 794–811.
- GUÉGUEN PH., BARD P.-Y.** (2005). Soil-structure and soil-structure-soil interaction : experimental evidence at the Volvi test site, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 9, No. 5, pp. 657–693.
- HISADA, Y.** (1994). An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths (Part 1), *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, pp. 1456–1472.
- HISADA, Y.** (1995). An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths (Part 2), *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85, pp. 1080–1093.
- JENNINGS, P. C.** (1970). Distant motions from a building vibration test, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60, pp. 2037–2043.
- KHAM M., SEMBLAT J.-F., BARD P.-Y., GUÉGUEN P.** (2003). Interaction sismique entre un réseau d'immeubles et un bassin sédimentaire, in *Actes du Colloque AFPS03*, Paris.
- KHAM M.** (2004). Propagation d'ondes sismiques dans les bassins sédimentaires : des effets de site à l'interaction site-ville, *PhD thesis*, Université Marne-la-Vallée, France.
- KHAM M., SEMBLAT J.F., BARD P.-Y., DANGLA P.** (2006). Site-City Interaction : Main Governing Phenomena Through Simplified Numerical Models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(5), pp. 1934–1951.
- KANAMORI H., MORI J., ANDERSON D.L., HEATON T.H.** (1991). Seismic excitation by the space shuttle Columbia. *Nature*, 349, pp. 781–782.
- KIIMURA T., KUSAKABE O., TEKEMURA J.** (Editors). (1998). *International Conference « Centrifuge 98 »*, Tokyo, Balkema, 919 pages.
- KIM W.Y., SYKES L.R., ARMITAGE J.H., XIE J.K., JACOB K.H., RICHARDS P.G., WEST M., WALDHAUSER J., ARMBUSTER J., SEEBER L., DU W.X., LERNER-LAM A.** (2001). Seismic waves generated by aircraft impacts and building collapses at World Trade Center. New York City, *Eos Transactions of the American Geophysical Union*, 82(47), 565 pages..
- KITADA, Y., KINOSHITA M., IGUCHI M., FUKUWA N.** (1999). Soil-structure interaction effect on an Npp reactor building. Activities of Nupec : achievements and the current status. *Proceedings, UJNR (United States-Japan Cooperative Program in Natural Resources) workshop on Soil-Structure Interaction*, M. Celebi and I. Okawa Editors, September 22–23, 1998, Menlo Park, California, paper #18.
- KO H.Y., McLEAN F.** (Editors). (1991). *International Conference Centrifuge 91*, Boulder, 13–14 June, Balkema, 616 pages.

- LUENG C.F., LEE F.H., TEN E.T.S.** (Editors) (1994). *International Conference Centrifuge 94*, Singapore, Balkema, 836 pages.
- MANOS G. C., DEMOSTHENOUS M., TRIAMATAKI M., YASIN B., SKALKOS P.** (1995). Construction and instrumentation of a 5 storey masonry infilled RC building at the Volvi-Thessaloniki Euro-Seistest site. Correlation of measured and numerically predicted dynamic properties. *Proceedings, Third International Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 2, Amman, Jordania, pp. 857–866.
- MELI R., FACCIOLI E., MURIA-VILA D., QUAAS R., PAOLUCCI R.** (1998). A study of site effects and seismic response of an instrumented building in Mexico City. *Journal of Earthquake Engineering*, 2(1), pp. 89–111.
- MEZHER N.** (2004). Modélisation numérique et quantification de l'effet sismique site-ville. *PhD thesis*, École Centrale Paris, France.
- PAOLUCCI R.** (1993). Soil-structure interaction effects on an instrumented building in Mexico City. *European Earthquake Engineering* 3, pp. 33–44.
- PHILLIPS R., GUO P.J., POPESCU R.** (Editors) (2002). *Physical modelling in Geotechnics*. International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG'02), Balkema, 1025 pages.
- SEMBLAT J.F., LUONG M.P.** (1998). Wave propagation through soils in centrifuge experiments. *Journal of Earthquake Engineering*, 2(1), pp. 147-171.
- SEMBLAT J.-F., DUVAL A.-M., DANGLA P.** (2000). Numerical analysis of seismic waves amplification in Nice (France) and comparisons with experiments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19 (5), pp. 347-362.
- SEMBLAT J.F., KHAM M., BARD P.Y.** (2008). Seismic Site Effects in Alluvial Basins and Influence of Site-City Interaction. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(6), pp. 2665-2678.
- SEMBLAT J.F., PECKER A.** (2009). *Waves and vibrations in soils : earthquakes, traffic, shocks, construction works*, IUSS Press, Pavie, 499 p.
- TSOGKA C., VIRGIN A.** (2003). Seismic response of a set of blocks partially embedded in soft soil, *Comptes Rendus Mécanique*, 331(3), pp. 217-224.
- VIRGIN A., BARD P.-Y.** (1996). Effects of buildings on the duration and amplitude of ground motion in Mexico City. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86, pp. 914–920.